

## Comparativo entre uma decomposição média local composta otimizada e uma decomposição média local melhorada em sua aplicação para diagnóstico de falha em máquinas

Silva WTFD<sup>†</sup>, Borges FDDM<sup>†</sup>, Almeida, IO<sup>†</sup>

<sup>†</sup>*Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil.*

**Resumo.** Técnicas de processamento de sinais vem sendo desenvolvidas para extração de informação de uma grande variedade de problema interdisciplinares. Neste contexto, a decomposição média local (LMD) fora desenvolvida para extração de informações de sinais altamente complexos e modulados. Entretanto, sua performance pode levar a alguns problemas na separação do sinal, como a mixagem de modos. Dessa forma, duas novas técnicas baseadas na LMD foram implementadas recentemente e estudo acerca de sua efetividade em problemas reais ainda carecem de informações e dados. Sendo assim, esse trabalho propõe uma comparação entre esses diferentes algoritmos, executando estes para um mesmo sinal sintético e comparando parâmetros comumente utilizado para este fim, como o erro relativo médio quadrático e o tempo total de processamento. Também fora executado o processamento do sinal para um caso de análise de vibrações de um rolamento, sabidamente em estado de falha e verificado a acurácia dos métodos na separação destes dados e identificação da frequência característica de falha. O trabalho demonstra a notável semelhança entre os procedimentos, com leve superioridade da OELMD na decomposição dos sinais, porém com proibitivo tempo de processamento.

**Palavras chave.** *OELMD, decomposição média local, mixagem de modos, diagnostico de falhas.*

**Introdução.** Sistemas de transmissão mecânica têm sido adotados em uma grande gama de aplicações industriais, por isso problemas relacionados com a manutenção desses sistemas atraído considerável atenção nas últimas décadas [1, 2, 3]. Em sua obra, [4] desenvolveu um método de processamento de sinais muito estudado e desenvolvido nos últimos anos, a Decomposição Média Local, ou, do inglês, *Local Mean Decomposition – LMD*. Esta nova técnica consiste em uma série de decomposições auto adaptativas que apresenta um excelente funcionamento, fornecendo um conjunto de funções produto (FP) com significado físico para uma grande variedade de sinais eletromecânicos [4, 5]. No entanto, apresenta um problema intrínseco de mistura de modos, que pode reduzir o significado físico das FPs geradas, causando distorções na distribuição tempo-frequência do sinal resultante [5, 6].

Neste contexto, [5] desenvolveram um método que aplica ruído branco aos sinais de vibração coletados dos componentes mecânicos afim de mitigar o problema da mixagem de modos

da LMD, dando origem, assim, à Decomposição Média Local Composta, ou, do inglês, *Ensemble Local Mean Decomposition* – ELMD.

No entanto, apesar da comprovada eficácia da técnica [5, 6, 7], esta, segundo [3], seria altamente influenciada pela escolha de seus parâmetros, sendo eles a largura de banda de frequências do ruído branco, sua amplitude e o número de vezes que o procedimento é repetido. Ainda segundo o autor, o problema torna-se ainda mais crítico quando as amplitudes dos ruídos adicionados são superiores àsquelas do sinal original, pois assim seriam produzidas funções produtos redundantes, exigindo um elevado consumo computacional.

Por este motivo, [3] propuseram um método para aperfeiçoamento da técnica de [5], que ficou conhecida como Decomposição Média Local Composta Otimizada, ou, do inglês, *Optimized Ensemble Local Mean Decomposition* – OELMD. Nesta, o procedimento para obtenção dos parâmetros ideais à LMD baseia-se em um índice denominado Erro Relativo Médio Quadrático, ou, do inglês, *Relative Root-Mean-Square Error* – RRMSE. De acordo com [8], o RRMSE é definido como a razão entre o erro médio quadrático da decomposição do sinal original e seu valor médio quadrático. Ainda em conformidade com o autor, um valor ótimo de RRMSE mitigará o problema de mixagem de modos, inerente a LMD, aproximando-se apenas de um único modo do sinal original.

Todavia, também visando a melhoria da LMD, evitando o problema de mixagem de modos, [9] propuseram uma otimização do algoritmo original, porém sem a adição de ruído branco. No modelo proposto pelos autores, é definida uma função objetiva que considera duas características do sinal original. Baseado nessas funções objetivas, um mecanismo heurístico é proposto para determinar automaticamente o número ótimo de iterações necessário para o cálculo das funções produto da decomposição.

Sendo assim, este trabalho visou estudar o diferente comportamento dessas duas técnicas perante a problemas reais de monitoramento de condição de máquina, observando seus resultados na análise dos resultados de processamento de sinais de um mancal com defeito na pista externa.

**Metodologia.** Inicialmente, a comparação das técnicas é demonstrada por meio de um sinal sintético  $x(t)$ , exibido na Fig. 1, o qual foi proposto por [3] e consiste de três componentes na Eq. 1.

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \quad (1)$$

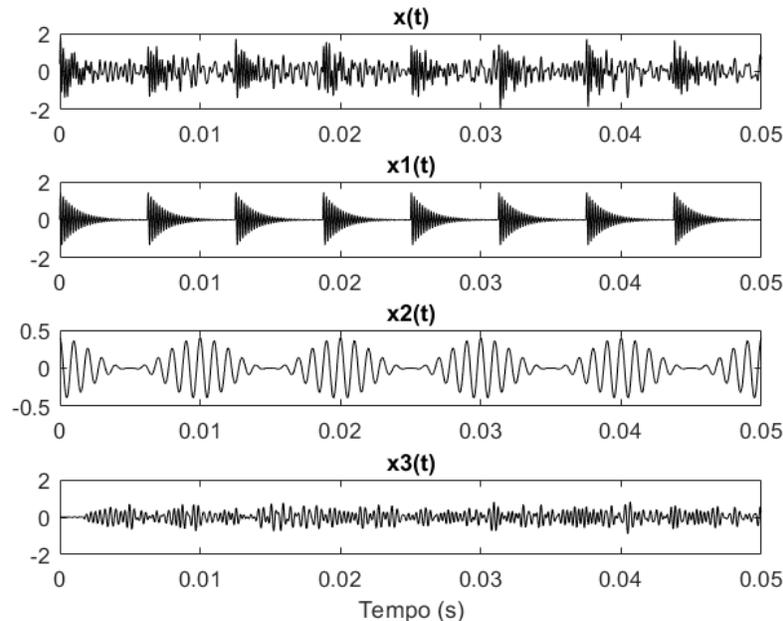
Os quais,

$$x_1(t) = 1,5 \cdot e^{-800t'} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 5000t) \quad (2)$$

$$x_2(t) = 0,2 \cdot (1 + \text{cos}(2\pi \cdot 100t) \cdot \text{cos}(2\pi \cdot 1000t)) \quad (3)$$

E,  $x_3(t)$  é um ruído branco gaussiano com largura de banda de 2 a 4 kHz. Na Eq. 2,  $t'$  é uma função periódica de tempo com período fundamental de 1/160s. Segundo o autor, essa frequência

foi escolhida pois, se comparada com ruídos de baixa frequência, os de alta geralmente apresentam contribuições maiores para a mudança nos extremos do sinal original.



**Figura 1.** Sinal sintético e suas composições.

Com os sinais definidos, as técnicas são postas a prova usando três parâmetros, sendo estes: o RRMSE, número de FPs geradas e o tempo total de processamento.

(a) Erro Relativo Médio Quadrático - RRMSE

Raiz quadrada da taxa da variação da decomposição média pelo sinal original, onde a taxa de variação é relacionada entre a diferença do sinal original e uma FP específica,  $c(t)$ . Quanto menor o RRMSE, maior a semelhança entre a função produto e a função comparada. Esta é dada por:

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (x(k) - c(k))^2}{\sum_{k=1}^M (x(k) - \bar{x})^2}} \quad (4)$$

(b) Número de FPs

FPs sem significado físico podem ser geradas pela LMD. Elas não são componentes verdadeiras e podem trazer confusão com o seu significado.

(c) Tempo total de processamento

O tempo total de processamento reflete uma eficiência média das técnicas em separar o sinal. Quanto menor o valor, mais eficiente é o processo. As simulações numéricas foram

executadas em um computador Intel Core i7-5500, com 8 GB RAM e em operação no Windows 10 Professional.

Haja vista que em sinais reais não se conhecesse as funções que compõe o sinal, a avaliação dos parâmetros (a) e (b) torna-se inviável para a comparação entre as metodologias estudadas. Sendo assim, é necessário definir no que diz respeito ao estudo de caso uma forma de qualificar a virtude da técnica de processamento de outra forma. À vista disso, é introduzido como forma de análise, a capacidade do algoritmo em obter em alguma de suas funções produtos, a frequência característica de falha do rolamento estudado, a qual é definida como a taxa de ocorrência dos impulsos gerados pelo contato entre o defeito e as superfícies do rolamento. Estas frequências, por sua vez, dependem da localização do defeito e são definidas pelas equações baseadas nos cinco movimentos básicos usados para descrever a dinâmica dos elementos rolantes. As frequências atribuídas à passagem dos elementos rolantes sobre os defeitos na pista externa (FBPO), pista interna (FBPI), gaiola (FC) e esferas (FB) são dadas, segundo [10], pelas Eqs. 5, 6, 7 e 8.

$$FBPO = \frac{ne \cdot fr}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \quad (5)$$

$$FBPOI = \frac{ne \cdot fr}{2} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \quad (6)$$

$$FC = \frac{fr}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \quad (7)$$

$$FB = \frac{D \cdot fr}{2d} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \varphi\right)^2\right] \quad (8)$$

Sendo que  $fr$  é a velocidade do eixo em Hz e  $ne$  o número de elementos girantes do rolamento. Como a frequência característica para defeitos nos elementos girantes diz respeito ao choque existente entre estes últimos e uma mesma pista, seja interna ou externa, em geral, ocorrerão dois pulsos por revolução do eixo. Sendo assim, os harmônicos pares da FB são dominantes, especialmente no espectro de envelope.

**Resultados e Discussões.** Com a definição que se busca a mitigação da mixagem de modos, o uso de uma função sintética é fundamental para a avaliação desse parâmetro. Nesta seção do trabalho, os dois métodos são comparados usando os três parâmetros descritos na seção anterior. Também fora possível avaliar qualitativamente, comparando as funções produto geradas (Fig. 1) e o espectro de Fourier (Fig. 2) a fim de identificar a mixagem de modos.

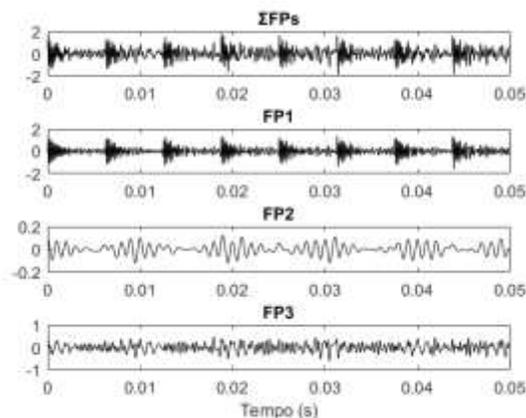
Os resultados da comparação dos parâmetros são exibidos na Tab. 1.

**Tabela 1.** Comparação de performance.

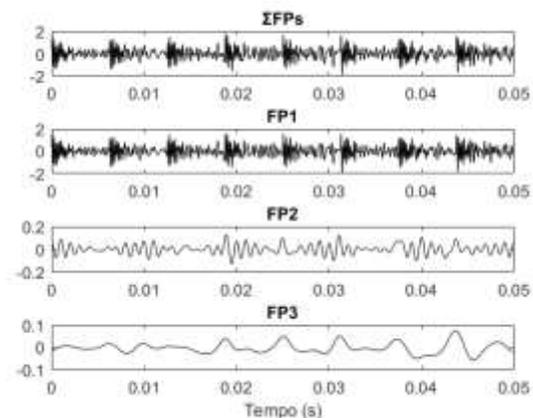
		<b>OELMD</b>	<b>LMD Melhorada</b>
Componente 1	RRMSE	0,5313	0,9669
Componente 2	RRMSE	0,7748	0,8220
Componente 3	RRMSE	0,7390	1,0033
Número de FPs		4	5
Tempo de Processamento Total (s)		259,88	0,13

Pela Tab. 1, observa-se uma grande superioridade da OELMD quanto a semelhança de suas funções produtos com as composições do sinal original, a qual também pode ser avaliada na Fig. 1 e Fig. 2, que por sua vez demonstra também o problema de mixagem de modos nos resultados obtidos pela LMD. Entretanto, a execução dessa técnica acarretou em um elevado consumo computacional e demasiado tempo de processamento.

(a) FPs obtidas pela OELMD

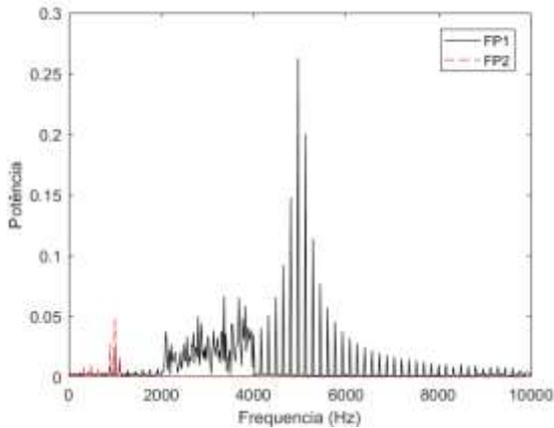


(b) FPs obtidas pela LMD Melhorada

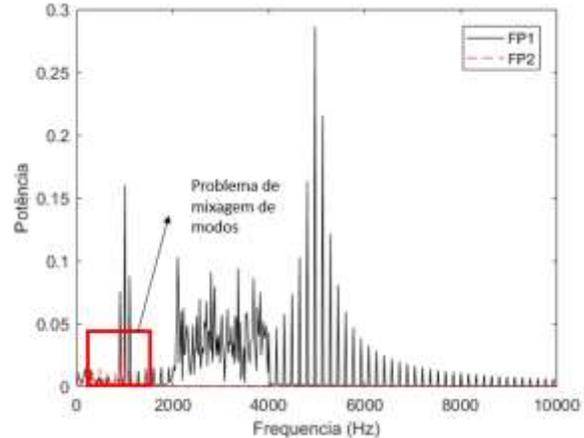


**Figura 2.** Funções produtos obtida para sinal sintético.

(a) FFT pela OELMD



(b) FFT pela LMD Melhorada

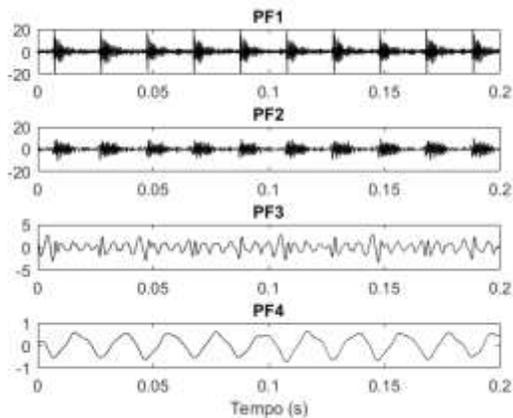


**Figura 3.** FFTs obtidas para sinal sintético

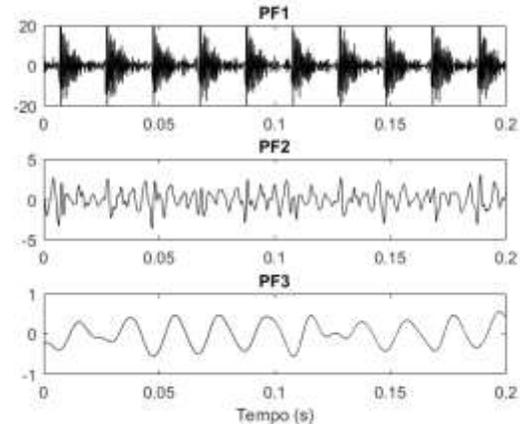
Ainda que os resultados para o sinal sintético já demonstram a tendência a melhores resultados da OELMD, o foco deste trabalho é demonstrar a aplicação destas em um caso real de monitoramento de condição da máquina. Porém, como neste caso não se conhecesse as composições do sinal, a avaliação se dá apenas de forma qualitativa, avaliando as FPs geradas, bem como os espectros de Fourier.

O estudo de caso fora realizado para um mancal e os resultados das funções produto geradas para o caso de defeito na pista externa são exibidos na Fig. 3.

(a) OELMD

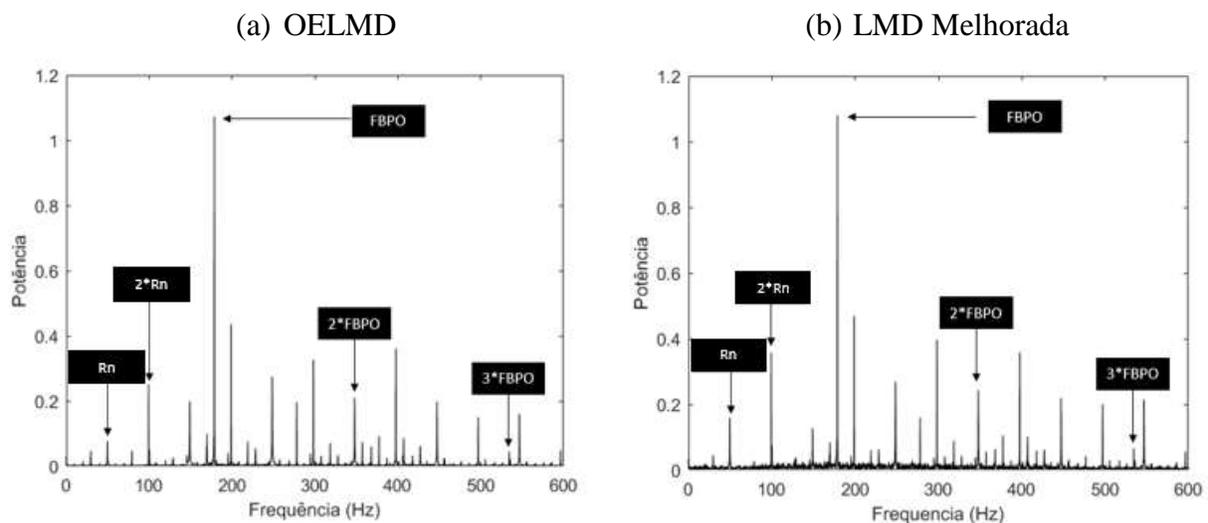


(b) LMD Melhorada



**Figura 4.** Funções produtos geradas para cada uma das técnicas

Conforme já dito anteriormente, não é possível avaliar com exatidão a qualidade das funções produto gerada devido ao fato de as componentes do sinal não serem conhecidas. No entanto observa-se a clara diferença entre os resultados para cada uma das técnicas, das quais, para a OELMD se obteve quatro funções produto, enquanto para a LMD três. A última função de cada uma dessas tende a demonstrar a frequência de rotação do motor (50 Hz), entretanto a OELMD demonstra uma superioridade em relação a concorrente em questão de deformação do sinal. Já no que diz respeito às duas primeiras funções produtos no caso da OELMD, ou somente a primeira no caso da LMD, é clara a superioridade da decomposição composta já que claramente separou com excelência os diferentes modos do sinal. Por último, a função produto remanescente traz consigo a frequência característica de falha e suas respectivas harmônicas como mostra a Fig. 5.



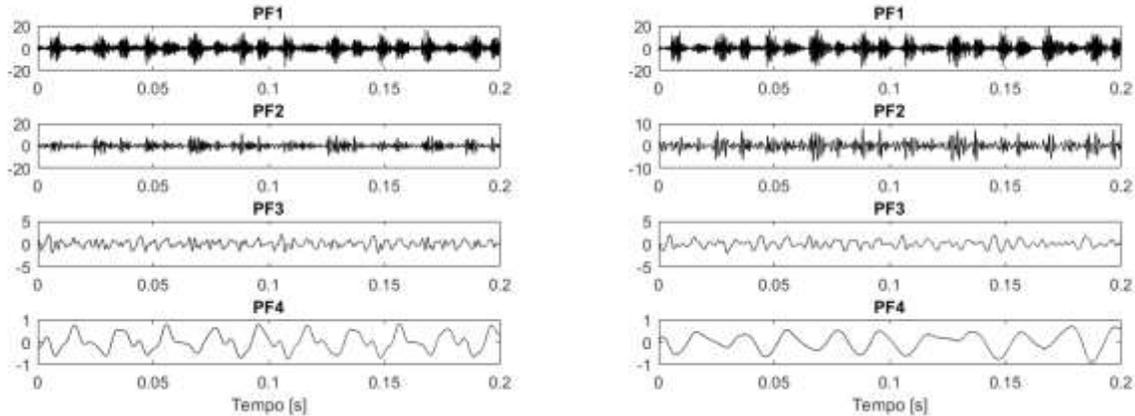
**Figura 5.** FFTs obtidas para sinal de mancal com defeito na pista externa

Fica evidente por intermédio da Fig. 5 que ambas as técnicas foram capazes de reproduzir com considerável acurácia as frequências características da falha no mancal de rolamento. É notável também a semelhança entre os espectros em frequência, haja vista as diferenças entre as duas técnicas.

No caso para defeito na pista interna também não houve grandes discrepâncias nas FPs geradas pelas duas técnicas conforme exibido na Fig. 6. Nesta situação, as duas metodologias geraram o mesmo número de funções, e novamente na última dessas é visível a superioridade da OELMD, a qual consegue obter um sinal não deformado e com a frequência de rotação do motor, bem como suas harmônicas.

(a) OELMD

(b) LMD Melhorada

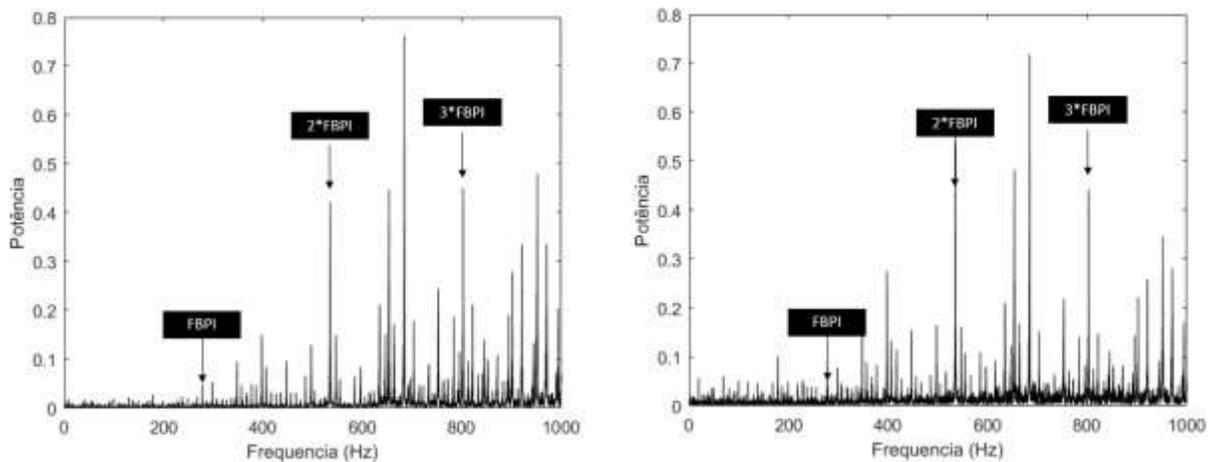


**Figura 6.** FPs obtidas para sinal de mancal com defeito na pista interna

Já na visualização dos espectros em frequência, fica evidente que as frequências características de falha se encontram, nesta situação, na segunda função produto obtida, e, conforme o exibido na Fig. 7, os dois algoritmos foram capazes de obter com notável precisão os picos nas frequências e suas harmônicas.

(a) OELMD

(b) LMD Melhorada



**Figura 7.** FFTs obtidas para segunda função produto do sinal de mancal com defeito na pista interna

**Conclusão.** Neste artigo, duas novas metodologias de decomposição média locais foram comparadas em sua aplicação em um caso real de monitoramento de condição da máquina. Da



análise realizada para a execução em dados sintéticos observou a superioridade da OELMD, já que está não apresentou o problema da mixagem de modos e ainda não teve nenhuma função produto excedente. No entanto, um elevado tempo de processamento pode representar um problema para suas aplicações em tempo real.

No tocante ao estudo de caso realizado com um rolamento sabidamente em estado de falha, não foi notado grande discrepância entre as duas novas técnicas. Apesar da também leve superioridade da OELMD, as duas conseguiram encontrar as frequências características de falha do rolamento e, com isso, mostraram efetividade na detecção de falha para o monitoramento de condição da máquina. Porém, em alguns casos, a LMD melhorada ainda demonstrou a presença de mixagem de modos, podendo, em sinais mais complexos, trazer problemas para a interpretação dos resultados.

Devido ao demasiado consumo computacional, estudo de técnicas para otimizar o processamento da OELMD torna-se uma sugestão de trabalho futuro.

**Agradecimentos.** À UNIOESTE e a Itaipu Binacional por possibilitarem o desenvolvimento deste trabalho.

**Divulgação.** Os autores relatam não haver conflitos de interesse neste trabalho.

### **Referencias.**

- (1) Randall RB. *Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. 1ed. ed. New Delhi: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- (2) Rai A.; Upadhyway SH. A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings. *Tribology International*, v. 96, p. 289-306, jan. 2016
- (3) Zhang C; Li Z; Hu C; et al.. An optimized ensemble local mean decomposition method for fault detection of mechanical components. *Measurement Science and Technology*, v. 28, n. 3, 2017.
- (4) Smith JS. The local mean decomposition and its application to EEG perception data. *The Royal Society Publishing*, 2005.
- (5) Yang Y; Cheng J; Zhang K. An ensemble local means decomposition method and its application to local rub-impact fault diagnosis of the rotor systems. *Measurement*, v. 45, n. 3, p. 561–570, 2012.
- (6) Li, Y et al. A new rotating machinery fault diagnosis method based on improved local mean decomposition. *Digital Signal Processing*, v. 46, p. 201–214, 2015.
- (7) Zhang LP; Liu HM; Lu C. Fault diagnosis technology of rolling bearing based on LMD and BP neural network. 2016, [S.l: s.n.], 2016. p. 1327–1331.
- (8) Guo W; Tse P. A novel signal compression method based on optimal ensemble empirical mode



decomposition for bearing vibration signals *J. Sound Vib*, 2013. p. **332** 423–41  
(9) Liu, Z. Improved local mean decomposition for modulation information mining and its application to machinery fault diagnosis. *Journal of Sound and Vibration*, v. 397, p. 266–281, 2017.